第 29 卷　第 10 期　材　料　研　究　学　报　Vol. 29 No. 10
2015 年 10 月　CHINESE JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH　October 2015

Nb 和 Ti 复合添加对微碳深冲钢组织性能与织构的影响*

汪志刚　张迎晖　杨泰胜　齐　亮　叶洁云

(江西理工大学材料科学与工程学院　赣州 341000)

摘 要 用SEM、TEM、XRD和EBSD等手段分析了不同Nb和Ti含量微碳钢第二相粒子的析出行为, 研究了析出相对微碳钢组织性能和织构演变的影响。结果表明, 微碳钢的析出相主要由尺寸较大的(Nb, Ti)(C, N)复合析出物、尺寸较小的弥散分布的Nb基碳化物和碳氮化物构成; 随着Nb、Ti添加量的增加, 细小的第二相粒子数量明显增多, 并在再结晶过程中强烈抑制<111>//ND纤维织构的发展, 尤其是{223}<110>和{111}<110>取向; 多边形铁素体基体以及在快冷过程中的马氏体相变确保了低Nb和Ti含量微碳钢的强度与深冲性能的良好匹配。

关键词 金属材料, 深冲钢, 析出相, 织构演变, 组织结构

分类号 TG113　　文章编号　1005-3093(2015)10-0779-08

Effect of Co-addition of Nb and Ti on Properties and Textures of Two Micro-Carbon Deep Drawing Steels

WANG Zhigang** ZHANG Yinghui YANG Taisheng QI Liang YE Jieyun

(School of Materials Science and Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

*Supported by Natural Science Foundation of Jiangxi Province No. 20144BAB2160012 and Scientific Research Found of Jiangxi Provincial Education Department No. GJJ14445.

Manuscript received March 19, 2015; in revised form June 2, 2015.

**To whom correspondence should be addressed, Tel: 15179089066, E-mail: wzgang2008cn@163.com

ABSTRACT Precipitation behavior of second phase in two micro-carbon steels with different amounts of Nb and Ti were investigated using SEM and TEM technique. In the meanwhile, the effect of precipitates on microstructure, texture evolution and properties of the micro-carbon steels was investigated by XRD and EBSD technique. Results show that precipitates in the micro-carbon steels were mainly consisted of larger size (Nb, Ti)(C, N) composite particles and finer Nb-based carbide and carbonitride dispersed in matrix. With the increasing of Nb and Ti addition the fine second phase particles increased significantly, which strongly inhibit the development of <111>//ND fiber texture during recrystallization, especially for {223}<110> and {111}<110> orientation. As for micro-carbon steel with low content of Nb and Ti, a good combination between strength and deep drawing ability can be acquired due to the occurrence of a matrix of polygonal ferrite and martensite transformation during fast cooling process.

KEY WORDS metallic materials, deep drawing steels, precipitate, texture evolution, microstructure

随着汽车轻量化进程的推进, 先进高强钢在汽车用钢中的使用比例逐渐提高。在钢中添加的Nb和Ti等强碳氮化物形成元素, 有析出强化和细晶强化的作用。R.K.Ray等[1]认为添加Nb和Ti不仅有强化的作用, 还可有效固定基体固溶C和N间隙原子, 从而大力发展<111>//ND纤维织构, 改善材料的深加工性能。

关于在超低碳(C%<0.01)钢中复合添加Nb、Ti后析出相对晶界迁移和织构的影响, 有较多报道[2-4]。商建辉等[5]和吕庆功等[6]认为, 尺寸粗大、稀疏分布的第二相粒子对再结晶织构影响较小, 而细小弥散分布的粒子对晶界迁移有强烈的拖拽作用且产生随机织构。Yoshida等[7]控制退火过程中的加热制度, 即可实现第二相粒子在再结晶阶段固定固溶C、发展再结晶织构, 又能在高温相变阶段向基体排碳, 提高淬透性。关于第二相粒子的析出形态、分布对织

* 江西省科技厅自然(青年)科学基金20144BAB2160012和江西省教育厅科技研究项目GJJ14445资助。

2015年3月19日收到初稿; 2015年6月2日收到修改稿。

本文联系人: 汪志刚

构的影响规律和作用机理, 尚缺少研究。目前的研究多集中在超低碳钢, 对在微碳钢(0.01<C%>0.05)中的应用报道较少。本文设计了两种不同Nb和Ti含量的微碳钢, 对比分析Nb和Ti含量对热轧板和退火板析出行为的影响, 并着重研究第二相粒子对其组织性能和织构演变的影响。

1 实验方法

实验用两种不同Nb、Ti含量的微碳钢: A钢(低Nb, Ti)和B钢(高Nb, Ti), 用50 kg真空感应炉冶炼, 其化学成分列于表1。锻坯经热轧6道次到5 mm厚, 终轧温度设计为900℃, 以确保在奥氏体未再结晶区轧制。终轧完成后层流冷却到650℃模拟卷取, 以形成大量第二相粒子固定基体固溶C。将热轧板酸洗后采用80%的冷轧压下至1 mm, 并从冷轧板中间部位沿轧向截取截面尺寸为220 mm×70 mm的试样。将试样在CCT-AY-II型板带退火模拟机上模拟连续退火, 其工艺路线为: 以15℃/s加热到710℃, 再以0.5℃/s加热到880℃保温80 s后, 以45℃/s快冷至室温。

沿热轧板和退火板的轧向制备金相试样和标距为50 mm的拉伸试样, 在MTS810试验机上测试材料的力学性能。用光学显微镜和ZEISS ULTRA 55型场发射扫描电镜观察截面微观组织形貌, 对部分退火样还采用lepera试剂侵蚀以观察其着色。分别用薄膜淬取复型技术和双喷减薄技术制取透射观察用试样, 并用JEM-2000FX型透射电镜和X射线光谱仪(EDX)观察第二相粒子析出和确定析出相成分。使用SIEMENS D5000 X射线衍射仪测量试样沿厚度方向距离表面1/4处的{110}, {200}和{211}三个晶面的不完整极图, 由此计算取向分布函数(ODF), 以进行宏观织构分析。在配有HKL Channel 5 EBSD系统的场发射扫描电镜上观察退火板截面沿轧向的微观织构, 其扫描步长为0.5 μm。

2 实验结果和分析

2.1 微碳深冲钢的组织结构和力学性能

图1给出了A钢和B钢的热轧板与退火板(880℃退火)的扫描组织和彩色金相结果。从图1a, b可以看出, 两种钢的热轧板组织主要由铁素体基体及少量碳化物构成, A钢的晶粒尺寸明显比B钢的小, 且铁素体晶界更为不清晰, B钢中的多边形铁素体含量更高。经冷轧和两相区退火后两钢的组织形貌产生明显差异(图1c, d), A钢主要由多边形铁素体及晶界上附着少量马氏体相所构成。从图1c右上角的放大照片可见, 马氏体的晶界呈现出Mn的富集所造成的亮白色边圈。图1e彩色金相也证实, 在A钢中形成了体积分数约为3.6%的亮白色马氏体相。B钢的退火板主要含铁素体相, 且呈现沿轧向拉长的形态。扫描和彩色金相结果均表明铁素体晶界比较纯净, 未观察到硬质相(图1d, f)。随着Nb和Ti含量的增加基体固溶C含量将随第二相析出量的增多而减少, 使在退火过程中更易发生铁素体相变, 而奥氏体的淬透性降低, 抑制了马氏体相变。另外, Nb和Ti形成的第二相粒子在再结晶过程中抑制晶粒长大, 使B钢的铁素体晶粒表现为沿轧向拉长的组织特征[8]。

图2a给出了两种钢退火板力学性能的比较。可以看出, A钢的屈服强度和屈强比明显低于B钢, 而延伸率和r值比B钢的高, 两种钢的抗拉强度差别不大。A钢的抗拉强度达到485 MPa, 总延伸率达到33%, 而且r值能达到1.3, 基本满足高强深冲钢的要求。这个结果说明, 在微碳钢中添加Nb和Ti也可实现深冲性能的优化, 同时还在铁素体基体中引入马氏体相变(图1c), 使其强度超过传统高强IF钢[9]。图2b的拉伸曲线表明, 两钢的热轧板强度较高, 延伸率较低, 且存在约6%的屈服平台。这与热轧板中存在大量细小的弥散分布的第二相粒子有关。经冷轧和临界区退火后两钢的抗拉强度降低, 延伸率提高, B钢仍存在约3%的屈服平台, 而A钢几乎表现为连续屈服。

2.2 微碳深冲钢的织构演变

用XRD技术分析了A钢和B钢从热轧板到退火板(880℃退火)的宏观织构, 图3给出了不同工艺下微碳钢φ2=45°的截面ODF图。对比图3a、d发现,

表1 实验钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of the test steel (%, mass fraction)

Steel	C	Si	Mn	P	Al	Nb	Ti	N/ $\times10^{-6}$	Bal.
A	0.024	0.35	1.78	0.046	0.018	0.072	0.015	45	Fe
B	0.023	0.34	1.79	0.062	0.018	0.120	0.029	51	Fe

两种钢的热轧板织构较弱, 均有密度较低的γ纤维织构。γ纤维织构往往是体心立方金属在热轧过程产生的再结晶织构, 而在B钢中由于碳更多以析出相存在, 使铁素体再结晶更充分。因此, A钢的最大取

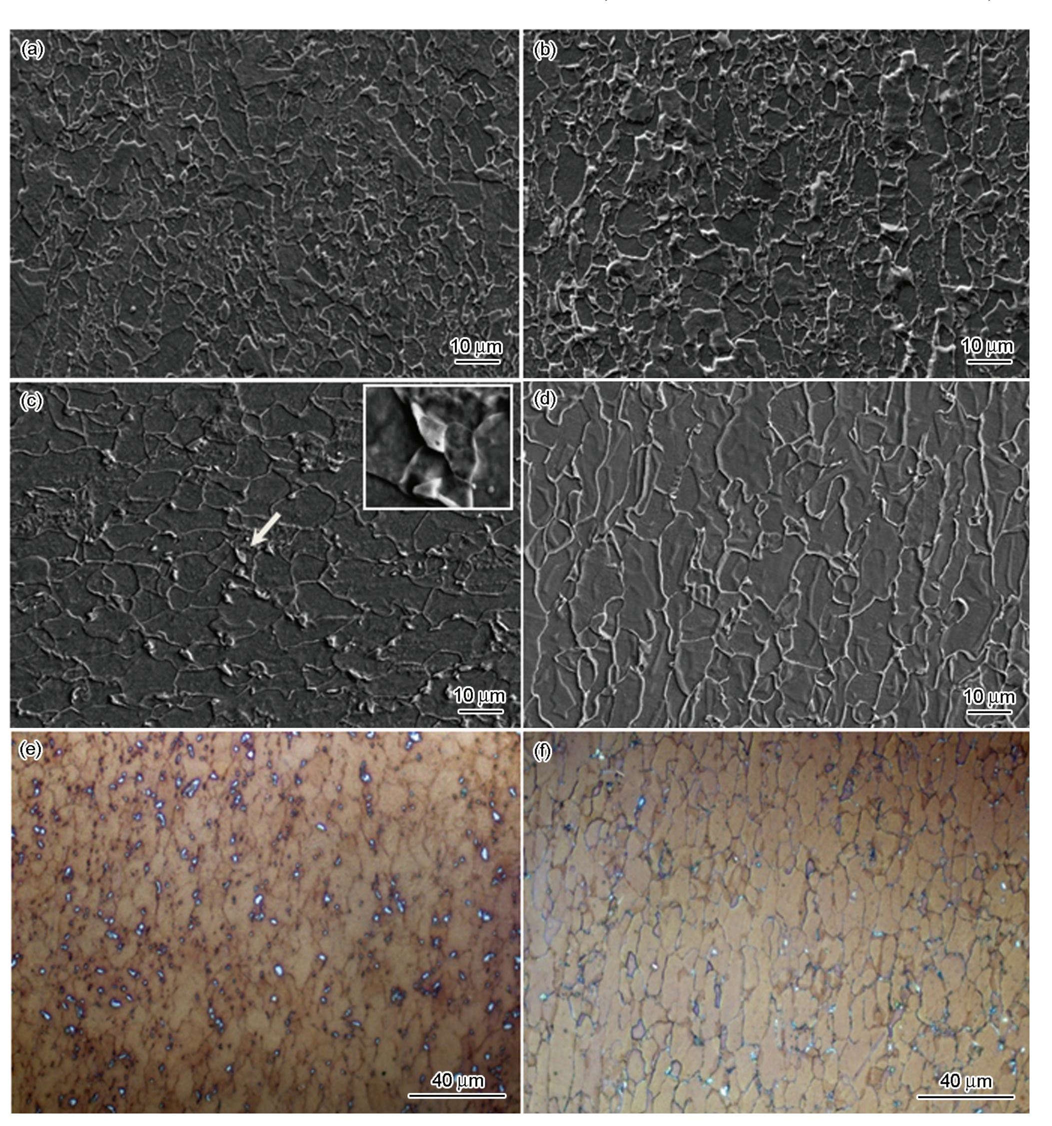


图1 A钢和B钢的热轧板和退火板的组织形貌

Fig.1 Microstructure micrographs of hot-rolled plate and annealed sheet of A steel and B steel (a) hot-rolled plate of A steel; (b) hot-rolled plate of B steel; (c) annealed sheet of A steel; (d) annealed sheet of B steel; (e) color-metallographic of A steel; (f) color-metallographic of B steel

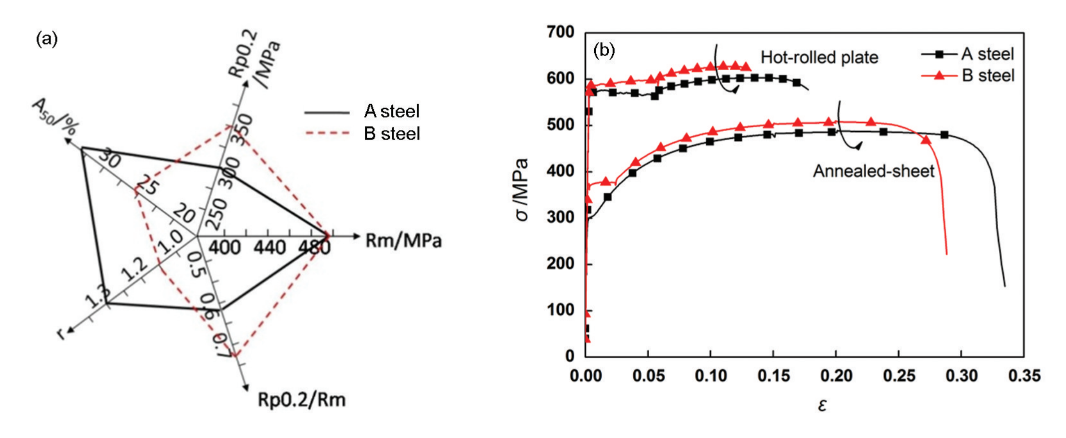


图2 两种钢的力学性能和拉伸曲线

Fig.2 Mechanical properties and stress-strain curves of two steels (a) comparison results of mechanical properties; (b) the engineering stress-engineering strain curves

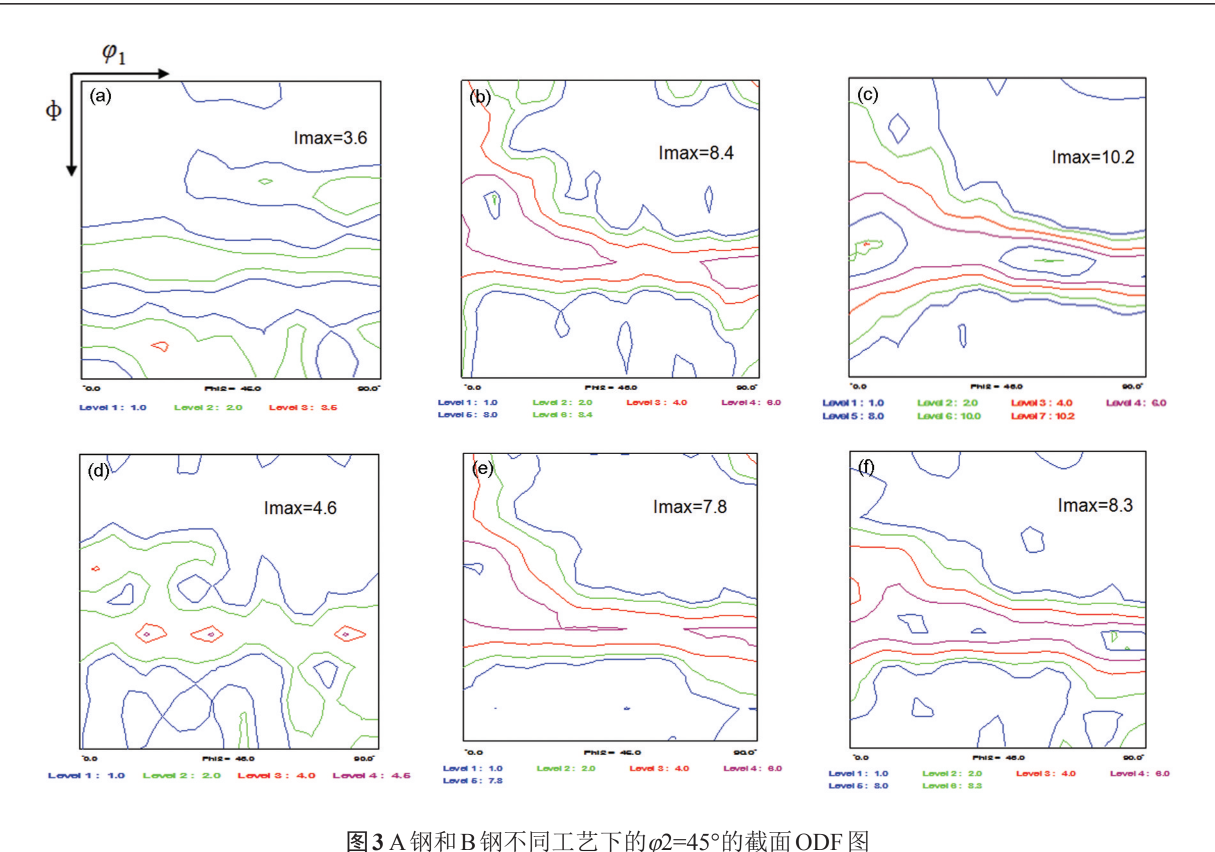


图3 A钢和B钢不同工艺下的φ2=45°的截面ODF图

Fig.3 φ2=45°section of ODF showing evolution of macro-texture of A steel (a-c) and B steel (d-f) after different process (a, d) hot-rolled plate; (b, e) cold-rolled sheet; (c, f) annealed-sheet

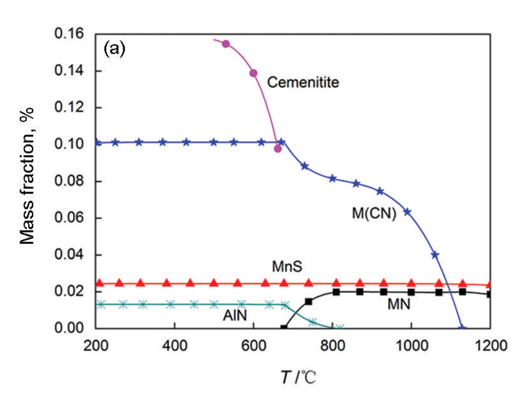
向密度值(3.6)比B钢的(4.6)低。同时, 在A钢和B钢热轧板中有少量的铜型织构和高斯织构。此类织构, 是在轧制过程中产生的形变织构遗留到热轧板中。体心立方金属中的织构一般属于不稳定织构, 在后续的冷轧和退火过程中会向α和γ纤维织构转变[10]。冷轧后两种钢均出现了明显的α和γ纤维织构(图3b, e), 还有一定量的旋转立方织构, 其它织构基本消失, 且织构强点集中在α纤维织构的{112}<110>和{223}<110>组分上。对比γ纤维织构强度, 可见冷轧板比热轧板均有所上升, 但是B钢的最大取向密度(7.8)略比A钢(8.4)的低。在冷轧过程中形变织构的产生决定于拥有有利取向的晶粒转动, 基体中的硬质相和第二相的析出都使其产生不均匀变形, 而使织构恶化。由于两钢均未经过临界区退火, 硬质相影响较小, 此时在B钢的热轧卷取过程中产生更多的第二相析出是其形变织构削弱的主要原因。在退火过程中有较高形变储能的γ纤维织构将优先形核, 并逐渐吞噬α纤维织构, 如图3c和f所示。两钢的α纤维织构均较弱, 织构强点均集中在γ线织构上, 且A钢的织构强度明显高于B钢, 这也是其r值偏高的主要原因。以上结果说明, 经历两相区退火后A钢中的相变并未对再结晶织构产生不利影响。N. Peranio的研究也表明[11], 相变对基体织构影响较小, 而相变产物是弱化材料织构的主要原因。B钢中存在的第二相析出对再结晶织构的发展构成了强烈影响, 且超过对形变织构的影响, 再次验证了第二相在退火过程中对再结晶行为的影响是恶化其深冲性能的主要原因。

3 讨论

3.1 Nb和Ti对析出相的影响

图4给出了用JMatpro-v5软件计算的A钢和B钢中除铁素体和奥氏体外的主要析出相的静态热力学曲线。可以看出, 两钢的主要析出相为M(CN)、MN、Cementite、MnS和AlN, 其中M代表Nb、Ti或NbTi复合。两钢的M(CN)及MN析出物在650℃左右析出量达到峰值。因此, 在650℃模拟卷取后的热轧板中Nb、Ti及NbTi复合析出物的析出量达到最大, 从而固定了C和N间隙原子。同时, MnS和AlN的析出也可减少间隙原子, 使在冷轧和退火过程中有利织构充分发展。对比图4a, b还可发现, A钢中的M(CN)(蓝色线)和MN(黑色线)的析出量明显比B钢少, 进一步佐证了低Nb和Ti含量的A钢形成的第二相数量低于高Nb、Ti含量的B钢。

为了进一步验证上述计算结果, 图5给出了两



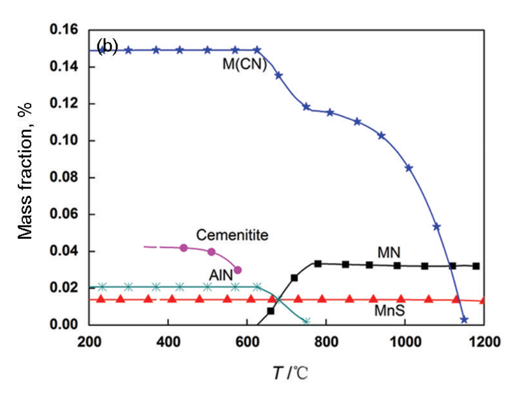


图4 析出相的质量分数与温度的关系

Fig.4 Cycle curves of mass fraction of precipitate with temperature (a) A steel; (b) B steel

钢的第二相析出形态及位错形态的TEM观察结果。可以看出, 两钢都有如图5a所示的典型的Nb和Ti的复合析出粒子, 其中方形粒子为Ti基第二相, 主要在冶炼和热轧高温阶段形成, 以TiN或Ti(C, N)为主。在随后的冷却过程中Nb基碳化物在晶体点阵畸变较大的晶界、亚晶界及位错等缺陷处优先形核, 促使(Nb, Ti)(C, N)复合析出粒子的形成, EDX谱线也证实了这一结果(图5j)。该类析出稳定性较高, 尺寸较大, 有固定C、N间隙原子的作用。另一类析出物如图5b所示, 主要是低温阶段形成的尺寸约20 nm的球形NbC粒子(图5k)。该类粒子易在晶界或晶界附近形成, 对晶界的迁移有拖拽作用。图5b还表明, 在铁素体基体内有大量弥散分布的细小析出物(白色方框所示)。进一步的观察结果如图5c所示, 该析出物尺寸为个位纳米级, 其衍射图谱如图5d所示, 经标定此衍射图对应为面心立方结构的MC型析出相, EDX结果表明为Nb基碳氮化物析出(图5l)。两钢热轧板拉伸时均出现约6%的屈服平台(图2b), 其产生机制可归结为两类。一类是基体中固溶的间隙原子在位错线附近的聚集引起的"柯氏气团"对位错的钉扎, 另一类是细小弥散的析出相与位错线的交互作用[12]。尽管大量第二相的析出固定了基体中的间隙原子, 但是弥散析出的第二相与位错的交互作用导致位错滑移难以顺利进行, 因此两钢的热轧板均有较高的屈服强度和较长的屈服平台。经两相区退火后, 随着热轧板中部分析出粒子的回溶退火板的屈服平台长度有所减小。但是A钢的析出粒子量(图5f, g)比B钢少(图5h, i)), 该结果与图4给出的计算结果相符。因此, B钢在退火后仍出现约3%的屈服平台。第二相粒子析出只是影响屈服平台的因素之一, A钢经两相区后产生了3.6%(体积分数)的马氏体相。朱国明等[13]认为, 双相钢中的马氏体相变在铁素体晶内及晶界诱发大量的可动位错, 从而消除部分屈服平台。

3.2 析出相对织构的影响

Nb和Ti形成的第二相粒子, 对在微碳钢退火过程中形成的再结晶织构产生强烈影响。析出相对再结晶的影响, 主要表现在两个方面。一方面, 析出相与位错的交互作用使位错的攀移和交滑移难度增加, 抑制了小角度晶界的形成以及亚晶的形成与长大, 从而影响晶粒的回复行为并阻碍有利取向的再结晶晶核的形成[14, 15]; 另一方面, 是Zener等[16]给出的再结晶的驱动力 F

$$F = MP = M(P_D - P_C - P_Z)$$
$$= M_0 \exp\left(-\frac{Q}{KT}\right)\left(\frac{\partial \rho G_b^2}{2} - 2\frac{\gamma_b}{R} - \frac{3F_v\gamma_b}{d_p}\right) \tag{1}$$

式中 M 为晶界迁移能、P_D 形变储能、P_C 晶界弯曲阻力、P_Z 第二相粒子钉扎力, Q 为热激活能、T 为温度、ρ 位错密度、G_b 剪切模量、γ_b 晶界能、R 晶粒半径、F_v 第二相粒子的体积分数、d_p 第二相粒子半径。可以看出, 随着析出相粒子半径 d_p 的减小体积分数 F_v 的增多, 钉扎力在逐渐增大, 再结晶驱动力在逐渐减小, 再结晶被抑制。该过程通过增加大角度晶界的迁移阻力以阻碍晶粒长大。因此, B钢经历退火后较多的弥散析出相抑制了再结晶的充分发展, 使铁素体沿轧向拉长, 而A钢表现为均匀分布的多边形铁素体晶粒特征(图1d, f)。

在体心立方金属的再结晶过程中具有较高Taylor因子及相应较高形变储能的{111}取向晶粒优先形成再结晶晶核, 在再结晶的后期逐渐吞噬周围形变的α纤维晶粒而长大, 也即γ纤维晶粒的"定向形核"机制[17]。如图6中的EBSD结果所示, A钢在770℃快冷后仍有一定量的形变晶粒, 且已发生再结晶的晶粒多为<111>//ND取向(蓝色)(图6b), 而形变晶粒多为<001>//ND取向(红色)。这个结果

说明, <111>//ND 再结晶织构的发展与再结晶程度的高低的密切相关。A 钢和 B 钢经历退火后再结晶织构类型差异较小, 均为γ纤维织构, 但是 B 钢的织构强度比 A 钢的低, 导致其r值偏低。这主要归因于 B 钢经退火后仍形成较多的第二相粒子在再结晶后期阻碍了γ纤维织构的发展, 尤其是{223}<110>和{111}<110>取向, 而 A 钢中由于较低含量的 Nb 和 Ti, 减少了第二相粒子析出数量, 同时在临界区退火过程中部分 C 扩散到过冷奥氏体中, 快冷后形成了马氏体, 有利于基体排碳, 因此其再结晶织构得到了充分发展。由此可见, 析出粒子尺寸较大且稀疏分布在基体中反而有利于再结晶形核, 若形成纳米级细小粒子且弥散分布在基体中反而阻碍再结晶织构的发展。

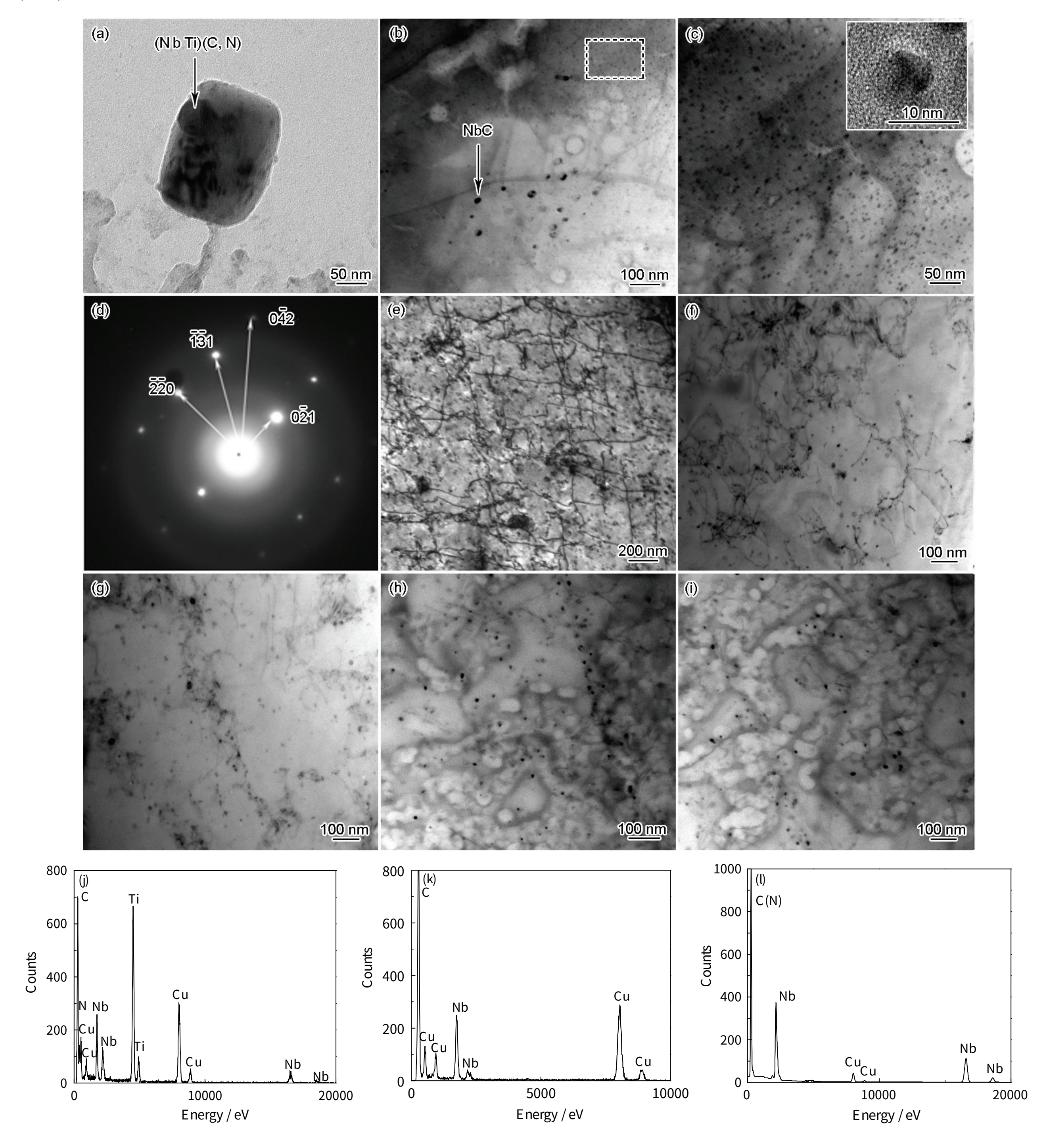


图 5 A 钢和 B 钢的热轧板和退火板的 TEM 观察结果和析出相的能谱

Fig.5 TEM images and EDX results of hot-rolled plate and annealed sheet of A steel and B steel (a-c) morphology of particles in hot-rolled plate of A steel; (d) dislocation locking in hot-rolled plate of A steel; (e) precipitate in annealed sheet of A steel; (f) precipitate in annealed sheet of B steel; (g-i) EDX results of hot-rolled plate

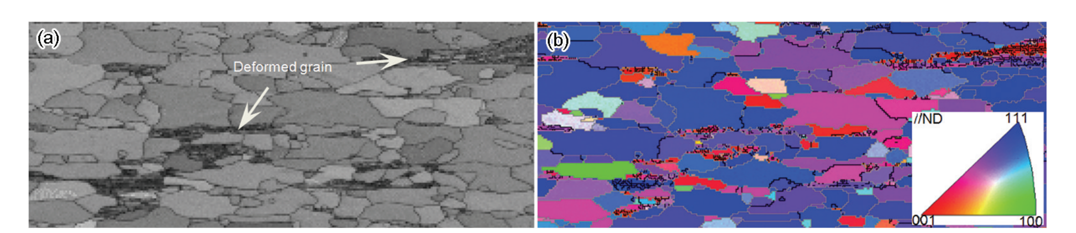


图6 A钢770℃的EBSD观察的衬度图和取向成像图(OIM)

Fig.6 EBSD test results of A steel at 770℃ annealing (a) contrast diagram; (b) orientation imaging

4 结　论

1. 在微碳钢中添加Nb和Ti可充分固定基体中的固溶碳, 发展再结晶织构, 两相区退火工艺可实现以铁素体为基体、在晶界上分布约3.6%的马氏体的组织特征, 使最终的抗拉强度为485 MPa, 延伸率为33%, r值达到1.3。

2. 在Nb、Ti复合添加的微碳深冲钢中析出相主要由尺寸较大(Nb, Ti)(C, N)复合析出物以及尺寸较小的Nb基碳化物和碳氮化物构成, 随着Nb和Ti添加量的增加第二相析出数量明显增多, 马氏体相变难度加大, 第二相与位错的交互作用导致较长的屈服平台。

3. 随着Nb和Ti含量的增加微碳钢的深冲性能恶化, 因为弥散分布的尺寸较小的析出物在再结晶后期抑制γ纤维再结晶织构的发展, 尤其是{223}<110>和{111}<110>取向的织构。

参 考 文 献

1 R. K. Ray, P. Ghosh, Texture in the design of advanced steels, Transactions of The Indian Institute of Metals, **66**(5-6), 641(2013)

2 GAO Fei, LIU Zhenyu, ZHANG Weina, LIU Haitao, SUN Guangting, WANG Guodong, Textures and precipitates in A 17% Cr ferritic stainless steels, Acta Metallurgica Sinica, **48**(10), 1166(2012)
(高　飞, 刘振宇, 张维娜, 刘海涛, 孙广庭, 王国栋, 17%Cr铁素体不锈钢中的第二相与织构, 金属学报, **48**(10), 1166(2012))

3 WANG Ruizhen, ZHANG Hongtao, Strengthening mechanism of Nb and Ti comples microalloyed strip steel produced by thin slab cating and direct rolling process, Acta Metallurgica Sinica, **43**(10), 1082(2007)
(王瑞珍, 章洪涛, 薄板坯连铸连轧工艺生产的Nb、Ti复合微合金化热轧带钢的强化机制, 金属学报, **43**(10), 1082(2007))

4 HE Xiaodong, HAN Xinli, YANG Hongbing, CHEN hongda, ZHANG Xueqin, Microstructure and Properties of Nb-Ti Microalloyed X60 Pipeline Steel Produced by CSP, Materials Engineering, **5**, 20(2008)
(何小东, 韩新利, 杨红兵, 陈宏达, 张雪琴, 铌-钛复合微合金CSP流程生产X60管线钢的组织与性能, 材料工程, **5**, 20(2008))

5 SHANG Jianghui, WANG Xianjin, JIANG Dongmei, KONG Bingyu, LU Jiangxin, Study on precipitation behavior of Ti-IF steel during hot rolling through thermo-mechanical simulation, Iron and Steel, **37**(1), 56(2002)
(商建辉, 王先进, 蒋冬梅, 孔冰玉, 陆匠心, Ti-IF钢第二相粒子在热轧过程中析出行为热模拟研究, 钢铁, **37**(1), 56(2002))

6 LV Qingong, CHEN Guangnan, ZHOU Jiacong, TANG Li, Textures in hot rolled steel sheet, Iron Steel Vanadium Titanium, **22**(2), 1(2001)
(吕庆功, 陈光南, 周家琮, 唐　历 热轧钢板的织构, 钢铁钒钛, **22**(2), 1(2001))

7 Hiromi Yoshida, Kaneharu Okuda, Effect of niobium addition on the texture formation of high strength cold-rolled low carbon steel sheets, Material Science Forum, (558-559), 425(2007)

8 HOU Ziyong, XU Yunbo, WU Di, Microstructure and texture of Nb+Ti-IF steels after ultra-short annaling, Chinese Journal of Materials Ressearch, **26**(1), 13(2012)
(候自勇, 许云波, 吴　迪, 超快速退火对Nb+Ti-IF钢组织和织构的影响, 材料研究学报, **26**(1), 13(2012))

9 XIAO Dongling, CHANG Shuzhan, Study on Microstructure and properties of high strength IF steel for automobile, Hot working technology, **43**(18), 208(2014)
(肖冬玲, 常书战, 汽车用高强IF钢的组织与性能研究, 热加工工艺, **43**(18), 208(2014))

10 H. Inagaki, Fundamental aspect of texture formation in low carbon-steel, ISIJ International, **34**(4), 313(1994)

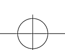
11 N. Peranio, Y. J. Li, F. Roters, D. Raabe, Microstructure and textureevolution in dual- phase steels: competition between recovery, recrystallization, and phase transformation, Materials Science and Engineering A, **527**, 4161(2010)

12 XIONG Ziliu, JIANG Haitao, CAI Qingwu, TANG Di, LIU Rendong, Tension test and microstructural mechanism for eliminating the yield platform of TRIP steel, Journal of University of Science and Technology Beijing, **30**(4), 379(2008)
(熊自柳, 江海涛, 蔡庆伍, 唐　荻, 刘仁东, 消除TRIP钢屈服平台的预拉伸实验及微观机理, 北京科技大学学报, **30**(4), 379(2008))

13 ZHU Guoming, KUANG Shuang, CHEN Guijiang, CHEN Bo, REN Junru, Effect of martensite on yield characteristics of cold-rolled C-Si-Mn dual phase steel, Journal of Materials Engineering, **4**, 66(2011)
(朱国明, 邝　霜, 陈贵江, 陈　波, 任君茹, 马氏体对C-Si-Mn冷轧双相钢屈服特性的影响, 材料工程, **4**, 66(2011))

14 GUO Yanhui, WANG Zhaodong, WEI Liqun, Investigation on the recrystallization Mechanism in warm-rolled Ti-IF steel, Journal of Materials Engineering and Performance, **23**(4), 1214(2014)

15 YANG Di, WANG Xu, MAO Weiming, ZHANG Shouhua, Recrys-



tallization nucleation mechanism on initial annealing in extra-deep drawing IF steel, Journal of University of Science and Technology Beijing, **15**(3), 280(1993)
(杨 弟, 王 绪, 毛卫民, 章守华, 超深冲IF钢退火初期再结晶形核机制, 北京科技大学学报, **15**(3), 280(1993))
16 C. Zener, Theory of growth of spherical precipitates from solid solution, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, **175**(15), 47(1948)
17 MAO Weimin, YANG Ping, Formation mechanisms of recrystallization textures in aluminum sheets based on theories of oriented nucleation and oriented growth, Trans. Nonferrous. Met. Son. China, **24**, 1635(2014)

